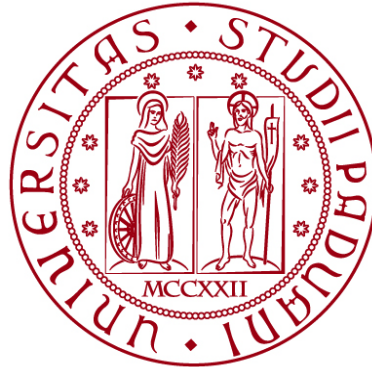


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E
AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Ingegneria Civile



TESI DI LAUREA

UPLIFT: ANALISI DEI PARAMETRI E DELLE
CONDIZIONI STRATIGRAFICHE DEL TERRENO

Relatore: Chiar.ma Dott.ssa FRANCESCA CECCATO

Laureanda: VANESSA RAISA

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

INDICE

GLI ARGINI E LE RELATIVE PROBLEMATICHE.....	2
1.1 STRUTTURA RILEVATO ARGINALE	2
1.2 MECCANISMI DI COLLASSO ARGINALE.....	4
METODI DI ANALISI DELLA STABILITA'	9
2.1 METODO DELL'EQUILIBRIO LIMITE.....	11
2.1.1 METODO DEI CONCI.....	12
2.1.2 METODO DI MORGENSTERN PRICE	14
2.2 METODO DI CALCOLO DELL'UPLIFT	14
CASO STUDIO.....	18
3.1 GEOSTUDIO 2012	18
3.1.1 IPOTESI DI SLOPE/W	19
3.2 . GEOMETRIA DEL MODELLO.....	19
ANALISI DEI DATI.....	22
4.1 ANALISI DESCRITTIVA DELLA ROTTURA ARGINALE	22
4.2 ANALISI DESCRITTIVA DEL PARAMETRO FS	26
CONCLUSIONI.....	33
APPENDICE.....	34
BIBLIOGRAFIA.....	37

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 1 - Parametri geotecnici dei materiali utilizzati per la modellazione delle sezioni arginali su GeoStudio	20
Tabella 2 - Tabella riepilogativa per l'inclinazione della scarpata arginale nelle diverse configurazioni arginali	21
Tabella 3 - Tabella valori FS al variare dello spessore della fondazione e dell'inclinazione della scarpata con indicate le tre diverse tipologie di rottura individuate all'interno della simulazione. Il colore blu indica le rotture di tipo uplift, il colore rosso indica le rotture che si sviluppano senza il raggiungimento delle sovrappressioni necessarie alla condizione di uplift, il colore arancione indica una rottura del solo corpo arginale	28
Tabella 4 - Equazioni delle rette di regressione che descrivono l'andamento della rottura di tipo uplift	31
Tabella A – Simulazioni numeriche effettuate.....	31

LISTA DELLE FIGURE

Figura 1 - Generica sezione arginale con specifici elementi [CIRIA et al., 2013]	3
Figura 2 - Meccanismi di instabilità del parametro esterno o interno.....	6
Figura 3 - Evoluzione fenomeno del sifonamento	7
Figura 4 - Fenomeno di uplift [CIRIA et al. 2013]	7
Figura 5 - Criterio di rottura di Mohr-Coulomb.....	10
Figura 6 - Configurazione metodo dei conci e del sistema di forze sul concio i-esimo	13
Figura 7 - Configurazione della rottura di tipo uplift.....	15
Figura 8 - Stratigrafia Argine 1 eseguita tramite Geostudio 2012	20
Figura 9 - Configurazione critica per argine con inclinazione della scarpata di 38°, altezza piezometrica al piede dell'argine di 1,3 m e spessore fondazione di 0,5 m	23
Figura 10 - Configurazione critica per argine con inclinazione della scarpata di 38°, altezza piezometrica al piede dell'argine di 2,8 m e spessore fondazione di 2,0 m	23
Figura 11 - Configurazione critica per argine con inclinazione della scarpata di 38°, altezza piezometrica al piede dell'argine di 4,3 m e spessore fondazione di 3,5 m	24
Figura 12 - Configurazione critica per argine con inclinazione della scarpata di 28°, altezza piezometrica al piede dell'argine di 1,3 m e spessore fondazione di 0,5 m	24
Figura 13 - Configurazione critica per argine con inclinazione della scarpata di 28°, altezza piezometrica al piede dell'argine di 2,8 m e spessore fondazione di 2,0 m	25
Figura 14 - Configurazione critica per argine con inclinazione della scarpata di 28°, altezza piezometrica al piede dell'argine di 4,3 m e spessore fondazione di 3,5 m	25
Figura 15 - Grafico spessore fondazione su parametro FS al variare dell'inclinazione β della scarpata	27
Figura 16 - Configurazione critica per argine con inclinazione della scarpata di 27°, H piezometrica al piede dell'argine 4,8 m e spessore fondazione di 4 m	27
Figura 17 - Configurazione critica per argine con inclinazione della scarpata di 27°, H piezometrica al piede dell'argine 3,3 m e spessore fondazione di 2,5 m	28
Figura 18 - Grafico inclinazione β della scarpata dell'argine su FS al variare dello spessore s della fondazione.....	30

Figura 19 - Grafico inclinazione β della scarpata dell'argine su FS al variare dello spessore s della fondazione con rette di regressione lineare associate ai valori dello spessore della fondazione..... 31

CAPITOLO 1

GLI ARGINI E LE RELATIVE PROBLEMATICHE

I cambiamenti climatici stanno sempre di più provocando fenomeni di dissesto idro-geologico sul territorio mondiale, si verificano eventi eccezionali come lunghi periodi di siccità, in cui canali e fiumi subiscono una carenza di acqua, susseguiti da improvvise e violente piogge prolungate che provocano, quindi, un innalzamento repentino del livello del pelo libero dei corsi d'acqua.

Risulta quindi di fondamentale importanza l'andare a determinare le condizioni in cui si verificano le diverse tipologie di rotture e, quando è possibile, l'andare a realizzare delle opere di sostegno e di difesa che ne prevengono l'accadimento.

1.1 Struttura rilevato arginale

Gli argini sono costituiti da rilevati artificiali in terra ed hanno la funzione di contenimento dell'acqua di piena e la preservazione del territorio circostante dalle inondazioni. Gli elementi che costituiscono un tratto arginale, ovvero una porzione a cui viene assegnata una specifica funzione ed avente una sezione trasversale omogenea, hanno il compito di garantire l'integrità dell'intero argine ma nel particolare hanno funzioni specifiche. Tra le quali possiamo individuare:

-Impermeabilità: viene definita anche come funzione primaria, in quanto, lo scopo di un argine è quello di andare a limitare il flusso di filtrazione attraverso il suo stesso corpo; per tale motivo vengono inseriti nel sistema di difesa ulteriori elementi che ne garantiscono l'impermeabilità;

-Drenaggio: è un altro elemento avente la funzione di andare a limitare le pressioni dell'acqua che essa esercita sul lato campagna, con lo scopo di evitare crolli futuri o fenomeni di erosione;

-Stabilità: è una caratteristica che deve essere sempre garantita durante la vita utile della struttura arginale per evitare rotture e crolli;

-*Protezione esterna*: dal momento che, la superficie degli argini, è esposta costantemente ad azioni esterne, quali l’impatto delle onde, l’azione degli animali e dell’uomo etc., vengono realizzati degli interventi di difesa. Questi interventi hanno quindi lo scopo di andare a proteggere la struttura da danni che andrebbero a comprometterne la funzionalità.

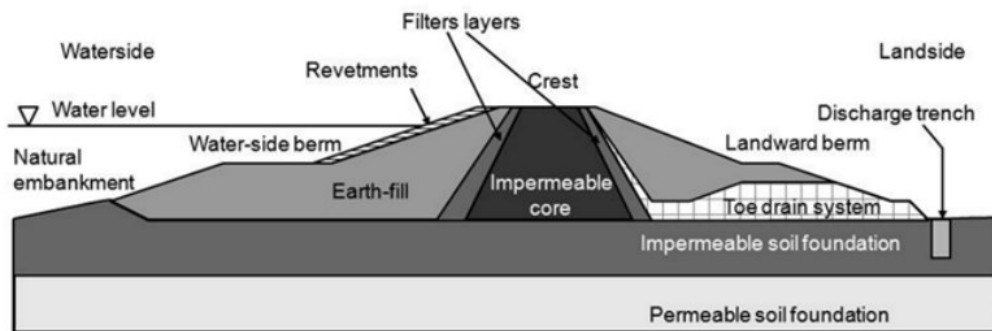


Figura 1 - Generica sezione arginale con specifici elementi [CIRIA et al., 2013]

Nello schema di *figura 1* sono evidenziati gli elementi di una generica sezione arginale.

Possiamo notare che, un argine, è costituito essenzialmente da due parti: il terreno di fondazione e il corpo del rilevato.

Il terreno di fondazione è lo strato su cui poggia direttamente il rilevato

ed ha la funzione di sostegno dell’argine, fornendone quindi la stabilità; inoltre, dovrà presentare delle caratteristiche di impermeabilità e di drenaggio.

Il corpo arginale è la componente principale dell'intero sistema, costituito da materiali granulari e coesivi come sabbie, limi e argille. Deve fornire una relativa deformabilità, per non dar luogo a fenomeni di collasso a seguito di fessurazioni, ed impermeabilità. Se quest’ultima caratteristica del rilevato non viene soddisfatta dal terreno, è possibile aggiungere un nucleo poco permeabile alla parte centrale del nostro argine o ricoprire la sezione di un apposito rivestimento avente, anche, la funzione di contrastare i fenomeni erosivi.

Con lo scopo di andare a stabilizzare il rilevato sulle due sponde si vanno ad inserire nel sistema le berme, ossia delle estensioni del mio argine dal lato del fiume o dal lato campagna. Esse, grazie ad una riduzione della pendenza media delle sponde, permettono di andare ad aumentare la larghezza della base della struttura andando così ad allungare il percorso di filtrazione in fondazione e ridurre l’azione erosiva che avverrebbe nel caso di sormonto della cresta dell’argine.

Possono, inoltre, essere inseriti dei sistemi di drenaggio nella zona al piede lato campagna con la finalità di raccogliere le acque di filtrazione incrementando lo stato di tensione efficace.

1.2 Meccanismi di collasso arginale

In particolari condizioni le componenti di un argine non riescono a svolgere le loro funzioni, quando questo avviene si può incorrere in fenomeni di collasso arginale che ne vanno a vanificare la funzione originaria.

Una rottura di un argine avviene, in particolare modo, quando vengono fatte delle errate considerazioni dal punto di vista ingegneristico durante la fase di progetto della suddetta opera. Viene fatta una prima distinzione tra le rotture; esse possono essere suddivise in rotture in fase di costruzione, come l'instabilità del paramento, e in rotture in esercizio, le quali risultano essere molto più pericolose in quanto provocano un'inondazione del territorio circostante. Le rotture in fase di esercizio possono inoltre essere ulteriormente suddivise in:

- *Rottura idraulica*: avviene quando l'inondazione non provoca alcun danno alla struttura arginale, ma è dovuta ad un errata elevazione della struttura stessa durante la fase di progetto;
- *Collasso strutturale*: l'inondazione che avviene è provocata dalla perdita di resistenza di uno o più componenti della struttura arginale o della fondazione.

La distinzione di questi due tipi di collasso non preclude il fatto che essi possano essere correlati tra di loro; infatti, una rottura di un tipo può essere la causa scatenante dell'altro.

Secondo la definizione di SLU, stato limite ultimo, che si può trovare nel NTC del 2018; il collasso arginale comporta una perdita di stabilità di questa tipologia. Questo, viene raggiunto per degrado e danneggiamento nel tempo di uno o più elementi che formano il sistema; i quali vengono attivati da azioni di carattere fisico o chimico come l'azione ciclica del flusso idraulico in alveo e subalveo, dall'azione del vento, dal comportamento dell'uomo e degli animali ed altri.

Se vogliamo quindi andare ad indagare ciò che attiva un collasso arginale si deve andare a tener conto di un'azione precisa, quale può essere un sovraccarico, un eccessivo livello del pelo libero dell'acqua o una sua rapida variazione, la forza di filtrazione o un'anomala crescita della portata. Uno o più elementi arginali possono subire queste azioni, anche ripetutamente nel tempo, fintantoché non avviene la rottura totale.

Trattando delle diverse tipologie di rotture o di danni arginali è possibile fare alcune distinzioni:

- *Erosione esterna*: è un tipo di erosione che può avvenire sia lungo l'alveo che lungo il lato campagna. Nel caso in cui si tratti di un'erosione lungo l'alveo, definita anche undercutting, il collasso può avvenire per mancanza di sostegno alla base causato da una sottoescavazione del piede dell'argine. Un fenomeno di questo tipo può essere causato dalla corrente turbolenta. Viene definita overtopping and overflowing invece quando l'erosione è esterna ed avviene per un sormonto arginale. Il collasso dell'argine, causato da questo fenomeno, avviene con l'apertura di una bocca di rotta arginale. Risulta anche essere il fenomeno di rottura arginale più diffuso;

- Erosione interna*: è il processo che prevede l'asportazione e l'allontanamento delle particelle fini a causa della formazione di condotti di filtrazione nel terreno del rilevato o negli strati di fondazione. Questi canali formati all'interno del corpo arginale possono pregiudicare la resistenza e portare alle condizioni di rottura arginale.
La forza di filtrazione risulta così essere il principale fattore che causa tale fenomeno; quando viene associata all'asportazione del terreno il flusso aumenta e con esso anche la forza erosiva dell'acqua comportando gravi problemi;

- *Instabilità del parametro arginale interno ed esterno*: in questo caso la precarietà dei fianchi arginali è dovuta a numerosi fattori, tra i quali possiamo individuare il regime di filtrazione, le pressioni dell'acqua, gli effetti dell'erosione e le attività svolte dall'uomo e dagli animali. In particolare, durante la fase di realizzazione di un argine il materiale argilloso viene compattato assumendo quindi, oltre alle caratteristiche intrinseche del materiale, un certo grado di compattazione e contenuto umido del suolo. Nel tempo però queste possono mutare venendosi così a creare delle fessure sulla struttura del mio argine, diventando quindi sede di moti di filtrazione che vedono l'aumento della pressione neutrale e il rammollimento del terreno causando così un collasso;

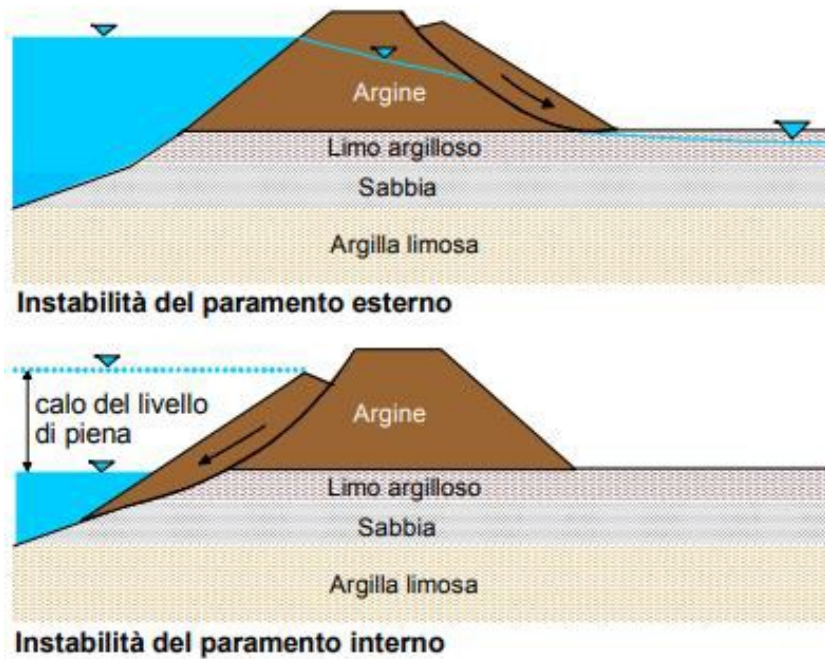
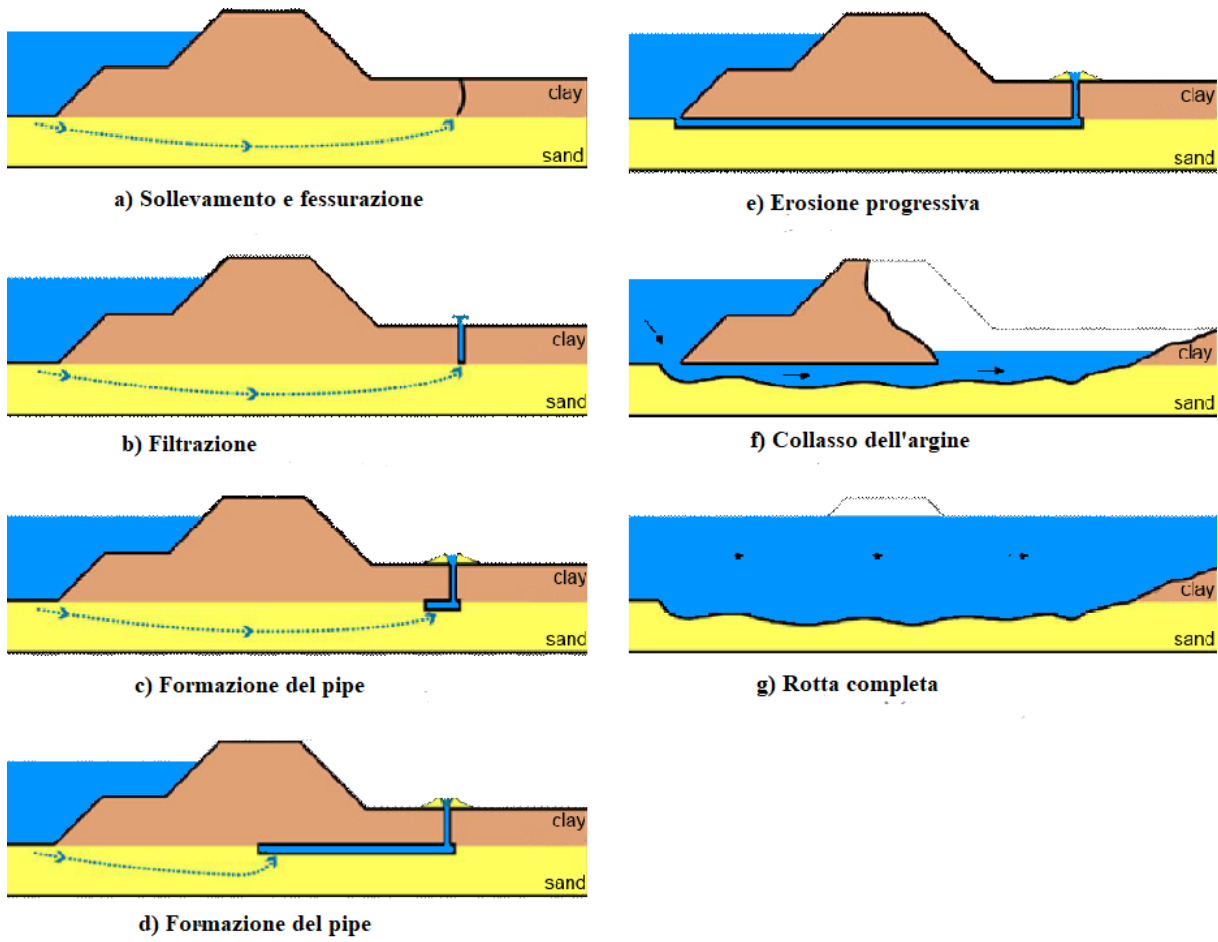


Figura 2 - Meccanismi di instabilità del paramento esterno o interno

-Instabilità al piede o a campagna per liquefazione statica e sifonamento: tale fenomeno viene definito *piping*. Si verifica a valle di un argine, durante la fase di piena, manifestandosi inizialmente attraverso fontanazzi per poi procedere in forma retrogressiva fino alla formazione di un canale sotterraneo di comunicazione tra l'alveo e il lato campagna. Prima del collasso, il terreno al piede dell'argine subisce un mutamento; ovvero avviene una liquefazione statica causata dall'aumento della componente verticale del moto di filtrazione rispetto alla forza di gravità;



-Instabilità del terreno di fondazione e dell'argine: causato dalla sottopressione idraulica al piede nel lato campagna, definito anche come Uplift.

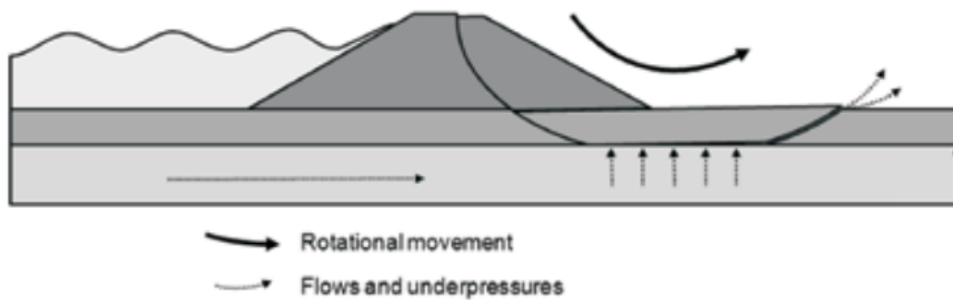


Figura 4 - Fenomeno di uplift [CIRIA et al. 2013]

È da considerare, quando si vuole prevedere le rotture arginali, il legame che il collasso può avere con le varie situazioni stratigrafiche del terreno, con il carattere transitorio dei fenomeni di dinamica fluviale e degli altri fenomeni che risultano piuttosto complicati da modellare matematicamente.

CAPITOLO 2

METODI DI ANALISI DELLA STABILITA'

Quando si tratta del problema della stabilità dei pendii o delle opere di materiale sciolto si fa riferimento alle equazioni di equilibrio ed ai legami costitutivi che descrivono il comportamento del terreno. Tale questione però risulta essere piuttosto complessa in quanto i terreni non hanno un comportamento lineare, per tanto non è possibile definire un legame costitutivo univoco di validità generale.

Al fine di rendere più semplici i metodi di analisi della stabilità sono state introdotte le seguenti ipotesi semplificative:

- *La deformazione del terreno è considerata piana:* quest'ipotesi risulta essere una semplificazione piuttosto importante dal punto di vista geometrico. Infatti, mentre nella realtà si ha a che fare con superfici cilindriche tridimensionali, ora le superfici vengono ricondotte a curve nel piano;
- *Il criterio di rottura di Mohr-Coulomb:* tale criterio di rottura mostra come la resistenza del terreno tenda ad aumentare linearmente con la tensione normale efficace. Il raggiungimento della condizione di rottura del materiale avviene quando il cerchio di Mohr interseca l'involuppo espresso dalla seguente relazione:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \varphi'$$

Dove:

- τ : la resistenza al taglio del terreno;
- c' : la coesione del terreno, espressa in termini di pressione;
- σ' : lo sforzo normale efficace a rottura;
- φ' : l'angolo di resistenza al taglio;

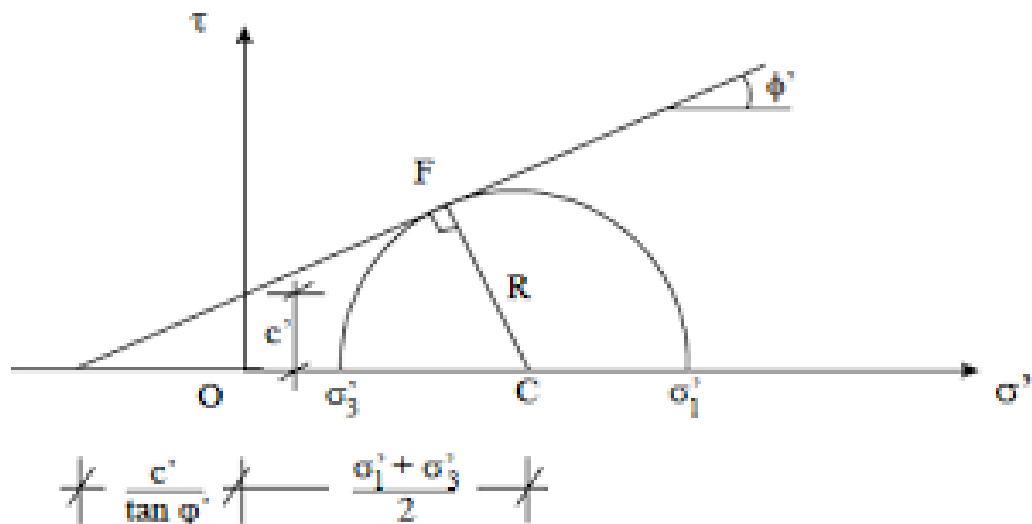


Figura 5 - Criterio di rottura di Mohr-Coulomb

È possibile definire la superficie di rottura come quella superficie che delimita la porzione di terreno che frana da quella che rimane indisturbata.

La parte di suolo che è interessata dallo studio della stabilità viene delimitata superiormente dalla superficie e inferiormente dalla superficie di rottura.

Secondo il capitolo “Progettazione Geotecnica” delle “Norme Tecniche per le Costruzioni” del 2018 affinché sia mantenuta la stabilità dei pendii di origine naturale, e quindi non si raggiunga una condizione di Stato Limite Ultimo, deve essere rispettata la seguente relazione:

$$E_d \leq R_d$$

Dove i due parametri in questo caso rappresentano:

- E_d : il valore di progetto dell'azione;
- R_d : il valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico.

Le verifiche di sicurezza allo SLU per gli argini vengono espresse nel paragrafo 6.8 delle NTC 2018, riguardante le opere di materiali sciolti. Per tali costruzioni viene richiesto che le verifiche vengano svolte utilizzando l'Approccio 1 con Combinazione di carichi 2 (A2+M2+R2). I coefficienti di sicurezza parziali per tali opere di sostegno sono espressi nella normativa vigente nelle tabelle 6.2.I, 6.2.II e 6.8.I, riportate di seguito:

Tab. 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni

	Effetto	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_{Qi}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾ Per i carichi permanenti G_2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G1}

Tab. 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ_γ	γ_γ	1,0	1,0

Tab. 6.8.I - Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e di fronti di scavo

COEFFICIENTE	R2
γ_R	1,1

Nel presente capitolo si vuole quindi presentare i diversi metodi di analisi utilizzati.

2.1 Metodo dell'equilibrio limite

Il metodo di analisi più utilizzato per valutare la stabilità di un pendio è il metodo dell'equilibrio limite globale, anche definito come LEM (“Limit Equilibrium Method”).

Tale metodo considera un'ipotesi aggiuntiva rispetto a quelle già considerate; infatti, il terreno viene considerato come un materiale avente un comportamento rigido-plastico. Questo implica che nel momento in cui si effettua l'analisi si va a considerare solo il momento in cui avviene il collasso, senza tenere conto dei cedimenti del terreno che possono essere avvenuti in precedenza.

Per determinare una soluzione del metodo è opportuno suddividere l'analisi in tre diverse fasi:

- La prima fase corrisponde all'individuazione di un meccanismo di collasso per il pendio in analisi e si ipotizza una possibile superficie di scorrimento;
- Nella fase successiva si calcola l'equilibrio statico, considerando le forze ed i momenti che agiscono sulla superficie, e determinando la resistenza lungo la superficie individuata;

- Infine, si esamina l'equilibrio statico rispetto ad un'altra superficie, tale operazione viene eseguita al fine di determinare il cinematico critico che caratterizza il problema considerato.

Le forze che agiscono su questa superficie si differenziano in forze stabilizzanti (R_d) e le forze instabilizzanti (E_d). Le prime derivano dalle caratteristiche meccaniche del terreno e vengono rappresentate come la resistenza al taglio lungo la superficie di rottura; ovvero si tiene conto di tutte quelle azioni che tendono ad opporsi al movimento. Le forze instabilizzanti, come si deduce anche dal nome stesso, sono quelle azioni che tendono ad allontanare il terreno dalla superficie di rottura e tendono quindi a favorire lo spostamento.

Il rapporto tra queste due diverse forze fornisce il coefficiente di sicurezza FS, ovvero quel parametro che viene considerato nel realizzare un'analisi della stabilità:

$$FS = \frac{R_d}{E_d}$$

La condizione di equilibrio limite risulta verificata nel momento in cui il rapporto FS risulta essere pari a 1, ovvero quando le due forze si equivalgono in modulo. In tale condizione lo stato tensionale lungo la superficie di scorrimento giace sull'involuppo di rottura di Mohr-Coulomb e il versante si trova sul punto di collassare.

2.1.1 Metodo dei conci

Un possibile approccio alla risoluzione del problema è il cosiddetto “metodo dei conci”, anche detto “metodo delle strisce”.

Tale criterio consiste nell'andare a rappresentare l'andamento delle tensioni lungo la superficie di scivolamento mediante la suddivisione della massa di terreno in n conci (non necessariamente delle medesime dimensioni).

Una volta che si è suddivisa la massa si applicano le equazioni di equilibrio alla traslazione e alla rotazione ai singoli conci per la determinazione del valore minore possibile del fattore di sicurezza.

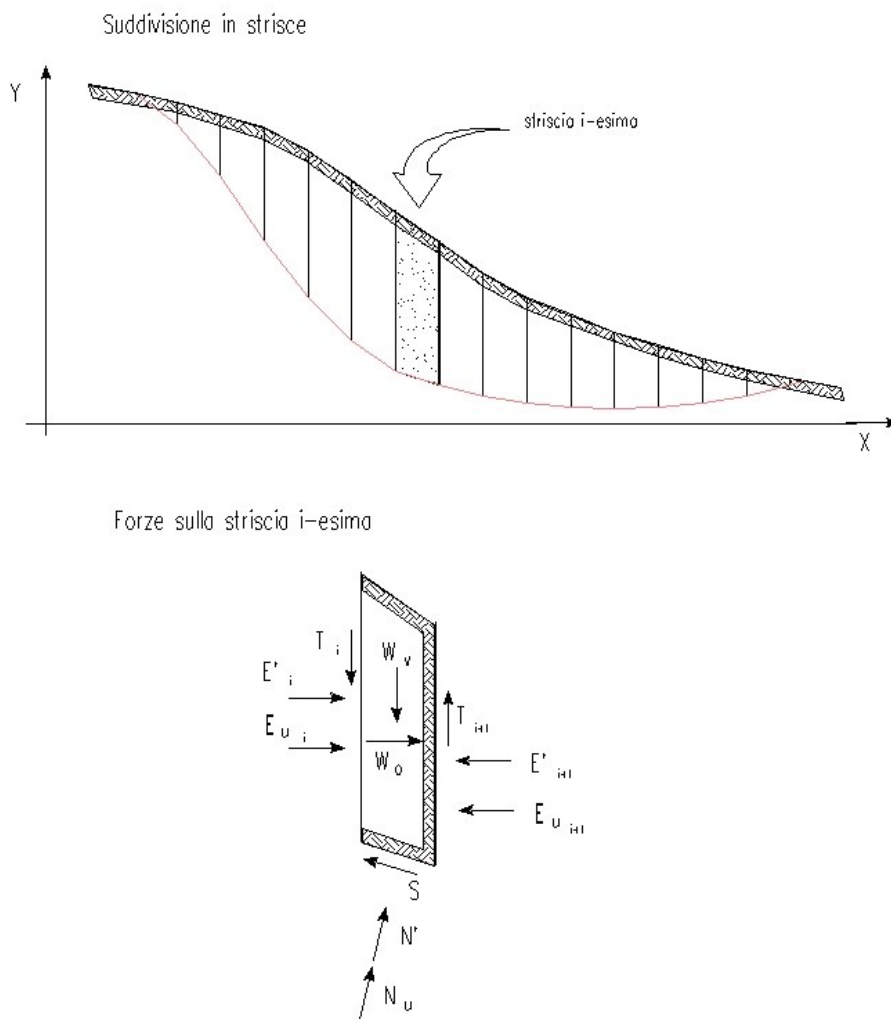


Figura 6 - Configurazione metodo dei conci e del sistema di forze sul concio i-esimo

Per i singoli conci è possibile scrivere le equazioni di equilibrio, di cui n sono le equazioni di equilibrio dei momenti per ogni concio e $2n$ le equazioni di equilibrio delle forze, ed n equazioni riguardanti la condizione di resistenza del materiale; per un totale di $4n$ equazioni.

All'interno del metodo si hanno anche delle incognite quali:

- Valore del coefficiente di sicurezza, usato nel metodo dell'equilibrio limite, ovvero come, che risulta la prima incognita;
- n forze normali applicate alla base di ogni concio;
- n date dal posizionamento della forza normale;
- n forze di taglio applicate alla base di ogni concio;
- $n-1$ forze di interfaccia tra i conci;
- $n-1$ date dal posizionamento delle forze di interfaccia;
- $n-1$ date dall'inclinazione delle forze di interfaccia.

La soluzione del problema risulta quindi staticamente indeterminata dal momento che per $4n$ equazioni si hanno $(6n-2)$ incognite. Tuttavia, è possibile ottenere una soluzione andando a ridurre il numero di incognite introducendo una serie di ipotesi semplificative.

La prima ipotesi semplificativa che viene fatta, che risulterà poi essere anche l'ipotesi comune ad altri metodi che furono realizzati in seguito basati su di esso, è che la forza normale agente sulla base del concio agisca sulla mezzeria di questo. Così facendo il numero delle incognite viene ridotto a $(5n-2)$.

Sulla base di questo metodo sono stati creati nuovi metodi di analisi, i quali vanno a considerare delle ipotesi aggiuntive.

2.1.2 Metodo di Morgenstern Price

Partendo dalle ipotesi del metodo dei conci Morgenstern, Price ed altri studiosi dell'Imperial College di Londra svilupparono un proprio metodo di analisi dei pendii.

Per rendere staticamente determinato il problema fu introdotta l'ipotesi che le forze di interfaccia tra i conci fossero legate tra loro tramite la seguente relazione:

$$\frac{X}{E} = \lambda f(x)$$

In cui X sono le forze verticali di interfaccia tra i conci, E sono le forze orizzontali, λ è un fattore di scala in grado di esprimere il valore percentuale della funzione mentre $f(x)$ è una funzione matematica scelta arbitrariamente.

Questa relazione, quindi, tende ad esprimere come varia la direzione della risultante delle forze della massa di terreno.

2.2 Metodo di calcolo dell'uplift

Il fulcro del presente elaborato è l'analizzare le condizioni stratigrafiche ed i parametri per il fenomeno di uplift attraverso una serie di simulazioni numeriche effettuate tramite il software GeoStudio (2012).

Sulla base degli studi effettuati nel corso del tempo si è evinto che il fenomeno di uplift avviene quando si ha un rilevato arginale formato da un terreno con una modesta resistenza meccanica

e poco permeabile, solitamente si ha una combinazione di torba e argilla, situato al di sopra di uno strato di terreno granulare, solitamente si tratta di uno strato di sabbia.

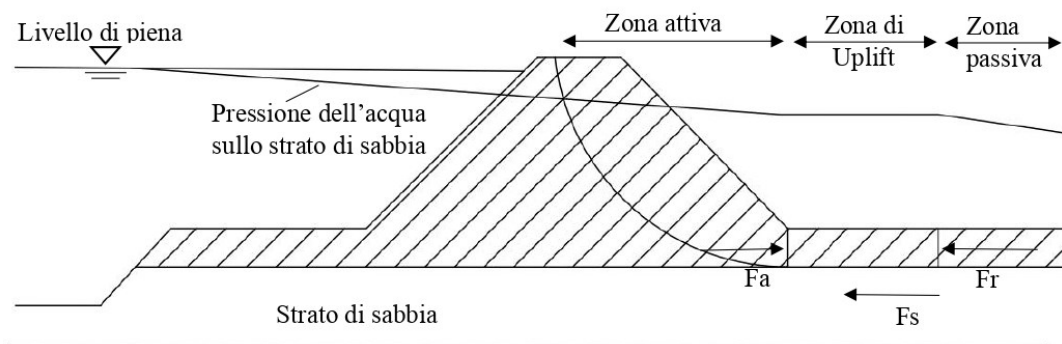


Figura 7 - Configurazione della rottura di tipo uplift

In figura 7 è presentata la geometria generale di un argine che subisce una rottura di tale tipo. In tale configurazione lo strato di sabbia risulta comunicante idraulicamente con il fiume; per cui, quando nel bacino si instaurano le condizioni di piena, e quindi si ha un innalzamento del livello del pelo libero dell'acqua, ha luogo ad un fenomeno di filtrazione diretta dall'alveo del fiume stesso verso il lato campagna. La prima conseguenza diretta di tale avvenimento è l'aumento della pressione nello strato granulare rispetto al valore idrostatico relativo al livello della falda freatica dal lato campagna, e si va quindi a ridurre lo stato tensionale efficace.

Il valore massimo che può avere la pressione nello strato di sabbia per il mantenimento delle condizioni di stabilità del rilevato arginale risulta essere pari a:

$$p_{max} = \gamma_{sat} d$$

Dove il parametro d rappresenta l'altezza dello strato del materiale granulare e γ_{sat} rappresenta il peso specifico del materiale considerato allo stato saturo; quindi, quando i pori dello strato di sabbia sono pieni d'acqua.

La pressione è quindi un elemento che va a determinare la stabilità del rilevato; quando questa risulta minore della p_{max} l'argine può svolgere le sue funzioni, quando invece questo valore viene superato va ad innescarsi il fenomeno di collasso.

Secondo lo studio effettuato da Allersma e Rohe (2003) il fenomeno è ben rappresentato nella figura 7, dove è facilmente individuabile la superficie critica, ovvero la superficie su cui agiscono le forze:

$-F_A$: spinta attiva, è una forza che tende ad allontanare il terreno dalla configurazione indisturbata;

$-F_S$: corrisponde alla resistenza della zona in cui avviene l'uplift;

$-F_R$: la spinta passiva viene a verificarsi quando il terreno risulta essere compresso dalla superficie.

Considerando tali forze agenti sulla superficie critica è quindi possibile andare a considerare una relazione di equilibrio delle forze che deve essere soddisfatta per il mantenimento della stabilità:

$$F_A \leq F_S + F_R$$

Con l'aumento della pressione dell'acqua presente nei pori dello strato di sabbia, il fattore di frizione F_S tra lo strato di argilla e la superficie di sabbia si riduce e può portare così al collasso definibile come uplift. Tale equazione è possibile ricondurla ad un'analisi delle forze agenti sul piano di scorrimento.

Possiamo definire la forza attiva dell'argine come una combinazione di forze:

$$F_A = \sigma \Delta w \sin \alpha - \tau \Delta w \cos \alpha$$

Dove α rappresenta l'angolo d'inclinazione, Δw è la larghezza della lamella, σ e τ sono lo sforzo normale e la resistenza al taglio che agenti sulla sezione.

La forza F_S è possibile determinarla andando ad integrare la formula sottostante sulla lunghezza L della zona di uplift e considerando un fattore σ' pari allo sforzo normale agente verticalmente.

$$F_S = \sum \Delta l (c' + \sigma'_v \tan \phi')$$

Dove c' è la coesione drenata del terreno, ϕ' è la frazione di angolo drenato nello strato di argilla.

Infine, per la determinazione del parametro F_R si fa riferimento alla "procedura di Coulomb"; per cui si considera un fattore $K=1$ che rappresenta il coefficiente di spinta passiva e un angolo ϕ pari a 45° , secondo la relazione:

$$F_R = \frac{1}{2} \gamma d^2 + 2 c_u d$$

Questo tipo di trattazione può essere semplificato considerando un moto quasi stazionario per il flusso dell'acqua presente negli strati di terreno; grazie all'utilizzo del coefficiente di permeabilità k , che per lo stato di sabbia assume dei valori con ordine di grandezza compreso tra 10^{-5} e 10^{-3} .

Storicamente, sono stati osservati pochi casi riconducibili a rotture di tipo uplift, verosimilmente a causa del fatto che lo sviluppo di sovrappressioni all'aumentare del carico idraulico causa anche altre tipologie di rottura, ed è necessario che il rilevato arginale sia di altezza sufficiente per far sì che si verifichi il fenomeno di uplift.

Per tale motivo risulta di fondamentale importanza andare a determinare le possibili correlazioni tra i parametri geotecnici dei materiali, la geometria e le condizioni ambientali in modo tale da riconoscere la rottura quando essa si verifica e prevenirla.

CAPITOLO 3

CASO STUDIO

Nella presente tesi sono state esaminate alcune simulazioni di rottura degli argini attraverso un software per la determinazione di una correlazione tra i diversi parametri geotecnici e la rottura di tipo uplift.

In particolar modo, nel seguente capitolo, viene descritto il metodo di analisi utilizzato per valutare il comportamento sperimentale dei rilevati attraverso il software GeoStudio 2012.

Si andrà quindi a presentare brevemente il software e le sue funzionalità principali, le ipotesi e le assunzioni che vengono fatte per analizzare il problema; successivamente si andrà a considerare la geometria dell'argine, la relativa stratigrafia ed i parametri geologici dei terreni.

3.1 GeoStudio 2012

GeoStudio è la suite software utilizzata per lo sviluppo e l'analisi delle simulazioni effettuate dal Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale dell'Università degli Studi di Padova. Il software, prodotto dalla casa Sequent Limited a Bentley company, permette di effettuare una modellazione ed analisi numerica per indagini geotecniche, idrogeologiche e geologiche.

All'interno di un unico pacchetto sono presenti diversi moduli quali SLOPE/W, SEEP/W, SIGMA/W, QUAKE/W, TEMP/W, CTRAN/W, AIR/W; in cui ognuno è in grado di effettuare delle analisi mirate al proprio caso studio.

Nella presente tesi, per l'analisi dei dati sperimentali è stata utilizzata l'applicazione SLOPE/W; funzione specifica per la stabilità dei pendii.

Tale modello ha la funzionalità di andare ad esaminare problemi semplici o complessi della stabilità dei pendii a fronte di diverse condizioni stratigrafiche, forme delle superfici di slittamento e condizioni di pressione dell'acqua interstiziale.

Nel caso in esame sono stati ipotizzati i valori dei parametri di coesione, angolo di attrito, peso di volume dei terreni interessati e il livello dell'acqua con il valore di altezza piezometrica corrispondente. Attraverso questi parametri, il software calcola un elevato numero di possibili superfici di scivolamento in cui è possibile andare a determinare la superficie critica di rottura e, quindi, il coefficiente di sicurezza minore.

3.1.1 Ipotesi di SLOPE/W

L'applicazione SLOPE/W va ad utilizzare i metodi dell'equilibrio limite per calcolare la stabilità del pendio, presentato nel capitolo [2.1.]. Nel caso in esame si è deciso di considerare delle superfici di rottura circolari che seguono il metodo di Morgenstern-Price [2.1.2.].

Per quanto riguarda la modellazione della risposta del terreno tra i vari metodi proposti dal software si è seguito il modello di Mohr-Coulomb per entrambi i materiali; il quale permette un'analisi di tipo reale dal momento che i parametri presi in considerazione sono quelli ricavati da prove in laboratorio e rielaborazioni di prove in sito.

L'analisi svolta permette, una volta definita la geometria e i parametri geotecnici, di andare a determinare il coefficiente di sicurezza FS per una serie di superfici di scorrimento, tra queste va ad individuare quella avente il valore del coefficiente di sicurezza minore, ovvero che individua la superficie critica.

3.2. Geometria del modello

L'analisi effettuata nella presente tesi è stata effettuata su 110 simulazioni numeriche di una struttura arginale al variare di alcuni parametri; in questo modo è stato possibile vedere il comportamento a rottura dei vari sistemi sotto diverse condizioni.

Per il modello in questione si è definito un rilevato arginale avente altezza costante e la stratigrafia presentata in *figura 10*. In particolare, il corpo dell'argine e la fondazione sono formati dal medesimo materiale di tipo argilloso indicato nella simulazione come MAT1, al contrario il materiale che si trova al di sotto dello strato di fondazione è un terreno granulare di tipo sabbioso indicato come MAT3.

In *tabella 1* si riportano i parametri geotecnici per entrambe le tipologie di terreno considerate.

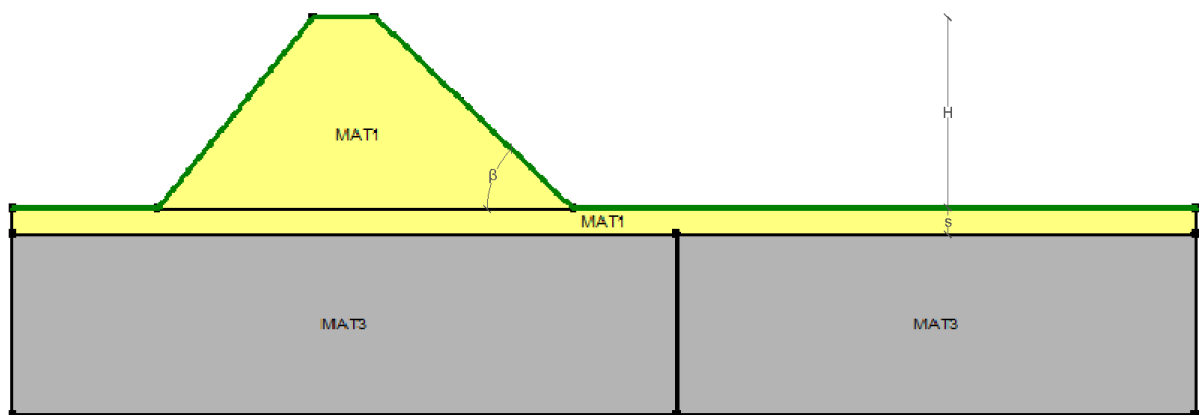


Figura 8 - Stratigrafia Argine 1 eseguita tramite Geostudio 2012

Tabella 1 - Parametri geotecnici dei materiali utilizzati per la modellazione delle sezioni arginali su GeoStudio

Nome identificativo materiale	Tipologia materiale	γ [kN/m ³]	ϕ' [°]	c' [kPa]
MAT1	Argilla	19,0	28°	3
MAT3	Sabbia	19,5	32°	0

Dove:

- γ : peso di volume [kN/m³];
- ϕ' : angolo di attrito [°];
- c' : coesione [kPa];
- H: altezza rilevato arginale [m];
- s: spessore della fondazione [m];
- h: altezza piezometrica misurata al piede dell'argine [m];
- β : angolo di inclinazione della scarpata arginale [°].

Per quanto riguarda la struttura della sezione arginale si è ipotizzato che in tutti i modelli l'altezza complessiva del rilevato fosse di 7,5 m dal piano campagna; tuttavia, nelle 11 configurazioni geometriche dell'argine si è posta variabile l'inclinazione β della scarpata. Essa, infatti, è stata fatta variare da un minimo di 26° ad un massimo di 38°.

Tabella 2 - Tabella riepilogativa per l'inclinazione della scarpata arginale nelle diverse configurazioni arginali

ID Argine	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Inclinazione scarpata arginale [°]	38	36	34	33	32	31	30	29	28	27	26

Complessivamente sono state considerate 11 configurazioni arginali in cui il parametro variabile risulta essere l'inclinazione della scarpata arginale. Successivamente, relativamente ad ogni configurazione, è stato fatto variare il parametro dello spessore della fondazione dell'argine, entro il range [0,5m-5m] con un incremento di $\Delta s=0,5$ m. Per quanto riguarda le condizioni idrauliche considerate nelle diverse simulazioni, sono state considerate al piede dell'argine le condizioni di incipiente di sollevamento; in tal modo l'andamento della linea piezometrica è aumentato con lo spessore della fondazione. In particolare, l'altezza piezometrica misurata al piede dell'argine varia linearmente entro un range di valori [1,3m-5,8m] con un incremento di $\Delta h=0,5$ m.

Riassumendo si riporta la *tabella A* in appendice in cui vengono riportate tutte le possibili combinazioni delle diverse simulazioni numeriche.

CAPITOLO 4

ANALISI DEI DATI

Nel presente capitolo verranno effettuate alcune analisi dei dati sulle simulazioni numeriche effettuate per andare a determinare una relazione tra i vari parametri della struttura arginale e le diverse configurazioni di rottura dell'argine. In particolare, verrà effettuata un'analisi descrittiva qualitativa che andrà a confrontare diverse configurazioni critiche di rottura ed un'analisi descrittiva sulla superficie di rottura degli argini analizzato l'andamento del Fattore di Sicurezza in funzione dello spessore della fondazione e, a seguire, verrà analizzato al variare dell'inclinazione della pendenza della scarpata.

4.1 Analisi descrittiva della rottura arginale

Per la presente analisi si vanno a considerare unicamente le configurazioni critiche di rottura per le diverse simulazioni. In particolare, in un primo momento si vuole andare a confrontare le diverse configurazioni di rottura degli argini. Verranno quindi confrontate la struttura dell'argine 1, avente inclinazione della scarpata pari a 38° , e la struttura arginale numero 6, avente un'inclinazione della scarpata pari a 28° . In tal modo si intende confrontare tre diverse configurazioni con altezze differenti dello spessore della fondazione.

Risulterà quindi possibile andare a vedere come varia la superficie di rottura critica dell'argine al variare sia dello spessore della fondazione sia dell'inclinazione della scarpata arginale.

In un secondo momento si andranno a confrontare le diverse tipologie di rotture dell'argine a parità di struttura ma al variare dello spessore della fondazione e dell'altezza piezometrica al piede dell'argine.

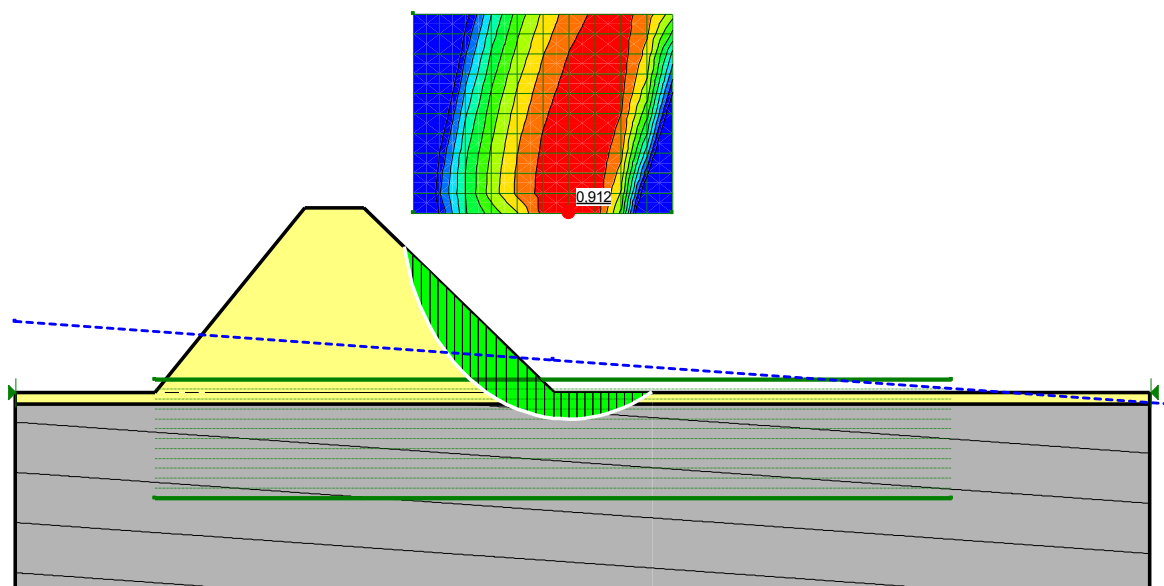


Figura 9 - Configurazione critica per argine con inclinazione della scarpata di 38°, altezza piezometrica al piede dell'argine di 1,3 m e spessore fondazione di 0,5 m

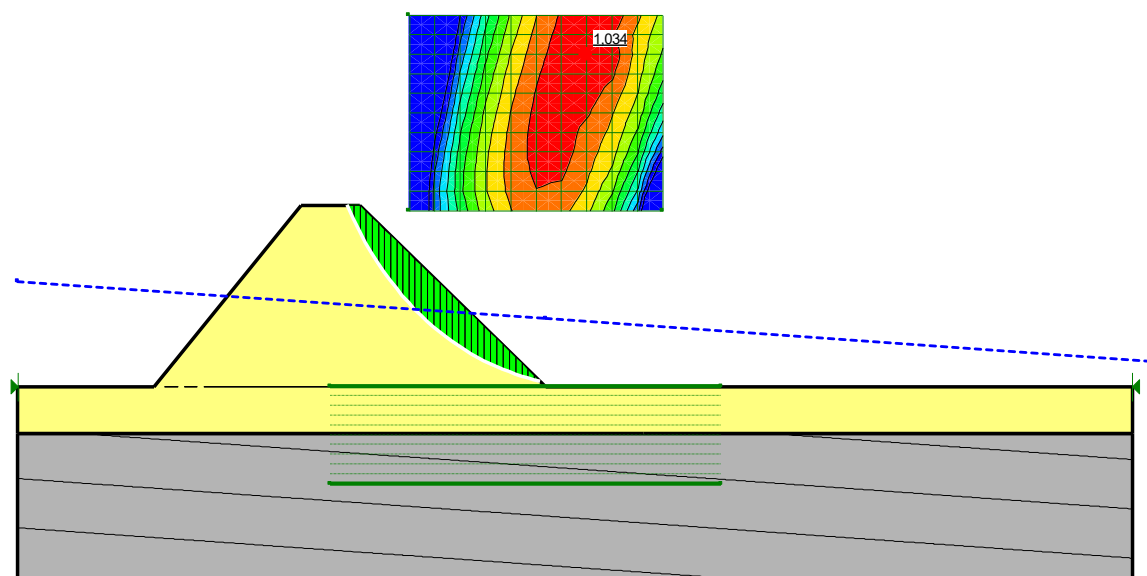


Figura 10 - Configurazione critica per argine con inclinazione della scarpata di 38°, altezza piezometrica al piede dell'argine di 2,8 m e spessore fondazione di 2,0 m

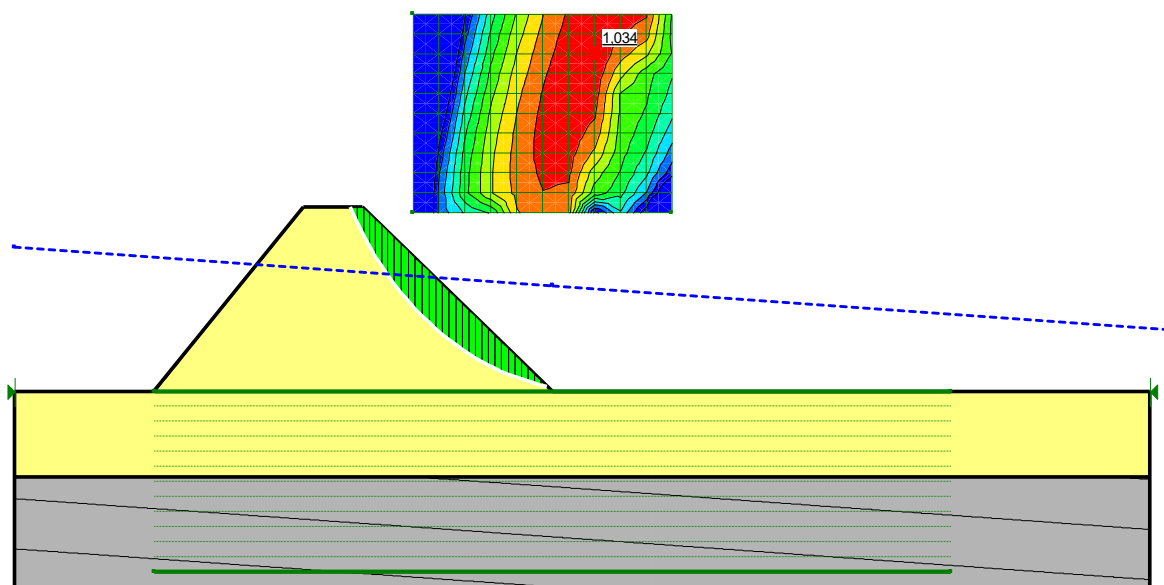


Figura 11 - Configurazione critica per argine con inclinazione della scarpata di 38° , altezza piezometrica al piede dell'argine di 4,3 m e spessore fondazione di 3,5 m

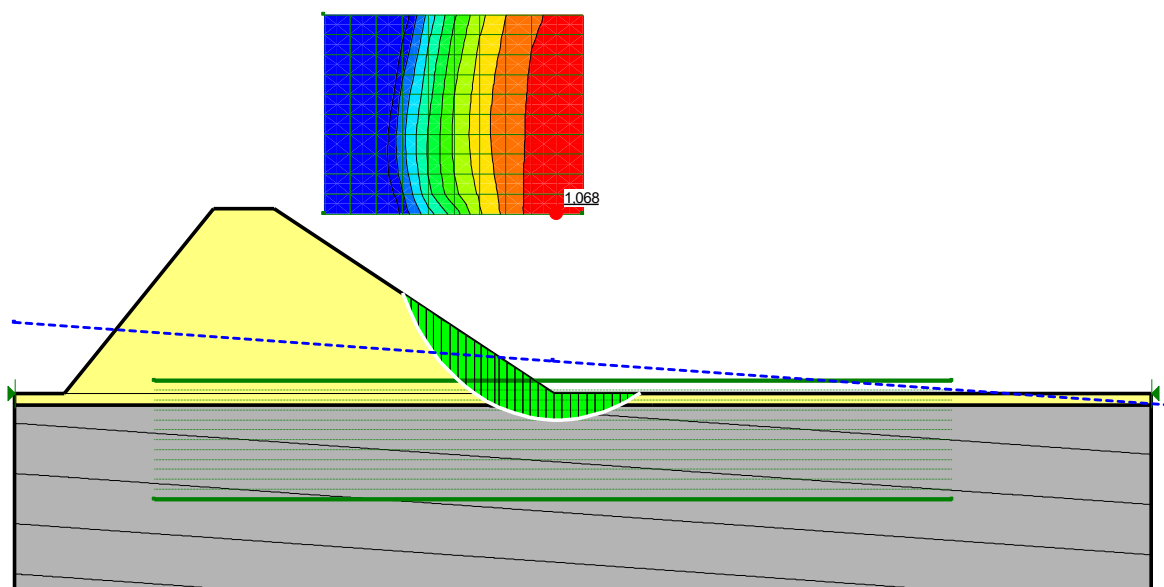


Figura 12 - Configurazione critica per argine con inclinazione della scarpata di 28° , altezza piezometrica al piede dell'argine di 1,3 m e spessore fondazione di 0,5 m

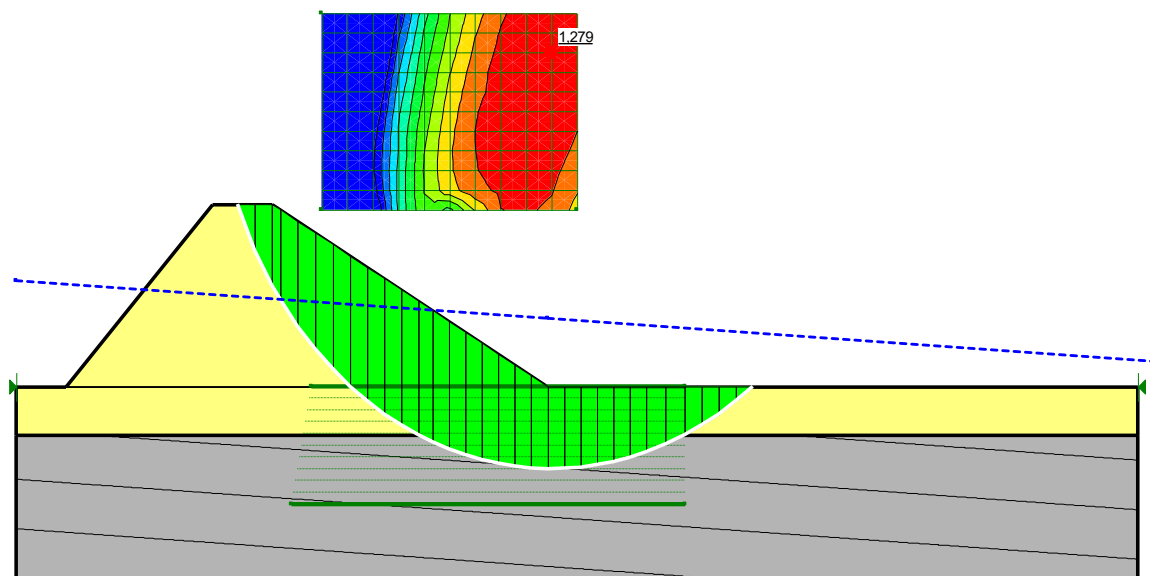


Figura 13 - Configurazione critica per argine con inclinazione della scarpata di 28° , altezza piezometrica al piede dell'argine di 2,8 m e spessore fondazione di 2,0 m

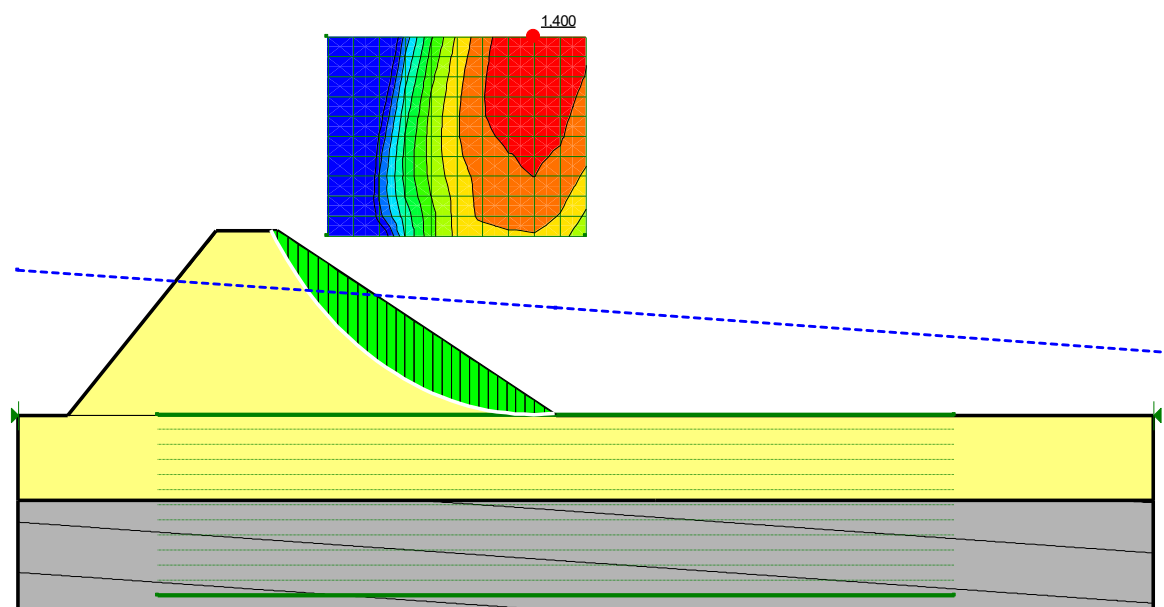


Figura 14 - Configurazione critica per argine con inclinazione della scarpata di 28° , altezza piezometrica al piede dell'argine di 4,3 m e spessore fondazione di 3,5 m

Confrontando le figure riportate sopra possiamo notare come al variare dello spessore della fondazione si abbiano rotture significativamente differenti. Infatti, nella configurazione in cui lo spessore della fondazione risulta pari a 0,5 m, la rottura avviene sia sul corpo arginale che su parte della fondazione; tuttavia, non è possibile definirle come una rottura di tipo uplift. Al

contrario la rottura che avviene sull'argine con spessore di fondazione pari a 2,0 m varia; nel momento in cui lo spessore della fondazione risulta piccolo, *figura 10*, la rottura avviene nel corpo arginale, mentre per uno spessore della fondazione s maggiore la rottura è definibile come uplift per quanto descritto nel paragrafo [2.2.]. Per uno spessore della fondazione di 3,5 m si ha che la rottura avviene unicamente nel corpo del rilevato. Tali considerazioni valgono sia per la configurazione 1 che per la configurazione 6 dell'argine.

Andando invece ad effettuare un confronto tra argini aventi pendenza della scarpata diversa ma stessa altezza della fondazione si può notare come la rottura tenda a spostarsi verso il piede dell'argine al diminuire della pendenza della scarpata.

Inoltre, andando a confrontare i valori del fattore di sicurezza è possibile notare che anch'esso tende ad aumentare all'aumentare dell'inclinazione in tutte e tre le configurazioni. Questo implica che all'aumentare dell'inclinazione della scarpata arginale si ottiene una diminuzione delle forze instabilizzanti E_d e di conseguenza una maggior stabilità.

Nel seguente paragrafo la relazione osservata verrà analizzata con un'altra campagna di indagini.

4.2 Analisi descrittiva del parametro FS

In questo paragrafo si andrà a considerare l'andamento del parametro FS al variare dello spessore della fondazione tenendo costante, per ogni singola curva del grafico, l'inclinazione della scarpata arginale; successivamente si andrà ad analizzare il caso contrario, ovvero al variare dell'inclinazione β della scarpata mantenendo costante lo spessore s .

Tali confronti vengono effettuati per andare a vedere se vi è una qualche correlazione tra il metodo di rottura uplift e i vari parametri andando anche a considerare il coefficiente di sicurezza FS.

Analizzando il primo grafico in *figura 15* si può notare come il Fattore di Sicurezza, in un primo momento, tenda ad aumentare all'accrescere dello spessore della fondazione; successivamente il fattore tende a stabilizzarsi ad un determinato valore.

Il valore dello spessore s di fondazione a cui corrisponde questo cambio di pendenza delle linee varia; esso, infatti, tende ad aumentare al diminuire dell'angolo di inclinazione della scarpata.

Quindi si può affermare che la variazione del Fattore di Sicurezza non dipende direttamente dallo spessore della fondazione Δs .

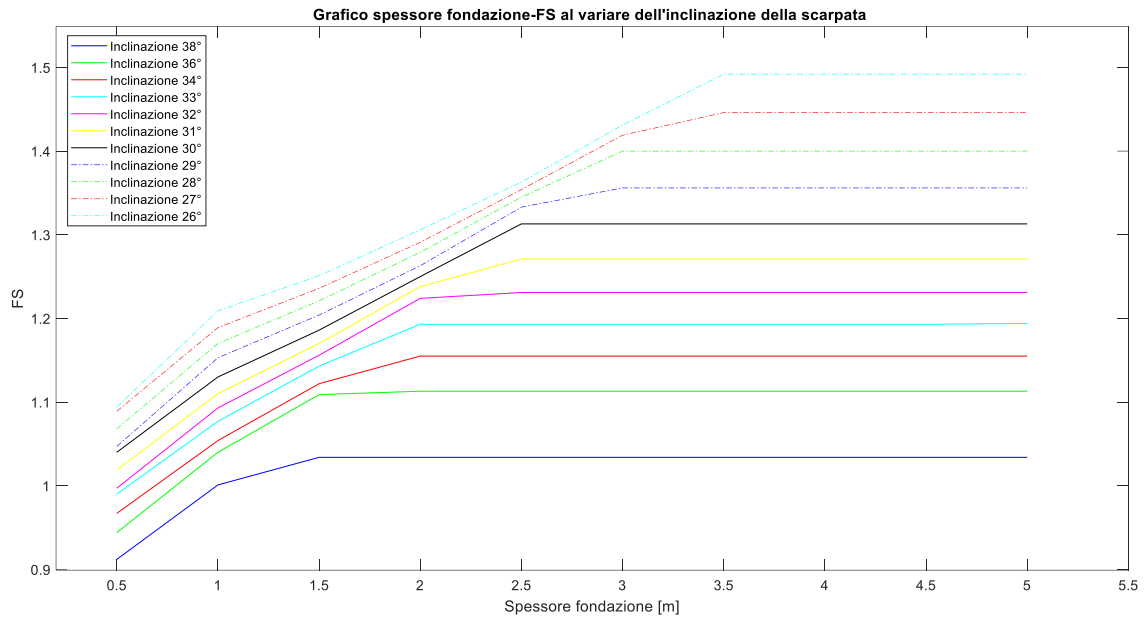


Figura 15 - Grafico spessore fondazione su parametro FS al variare dell'inclinazione β della scarpata

Già da questo primo grafico possiamo notare come i valori del Fattore di Sicurezza risultino essere più bassi e prossimi ad 1 per pendenze delle scarpate arginali elevate; mentre risultino più alti per pendenze per lievi.

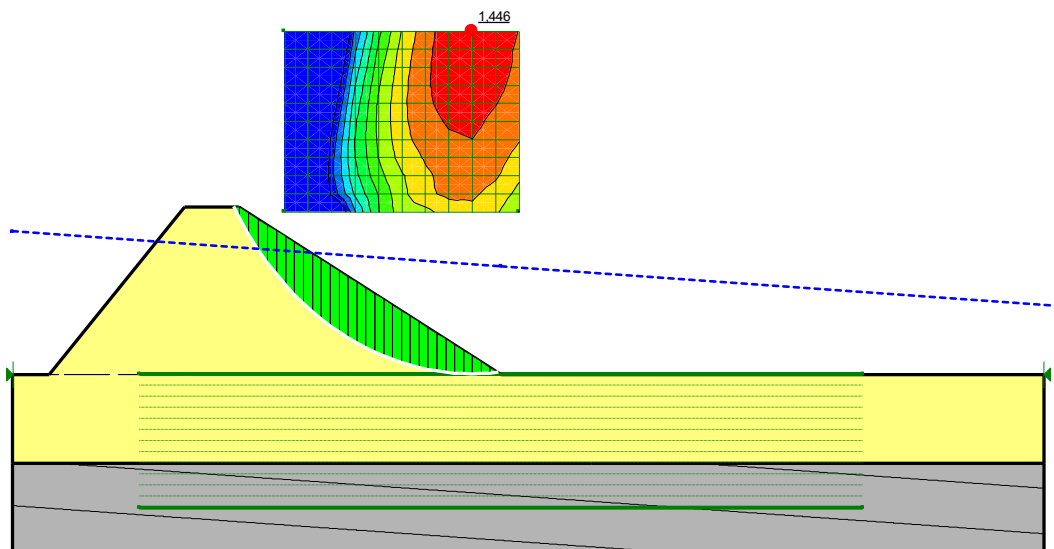


Figura 16 - Configurazione critica per argine con inclinazione della scarpata di 27°, H piezometrica al piede dell'argine 4,8 m e spessore fondazione di 4 m

Andando a visualizzare il tipo di rottura che avviene nel momento in cui il Fattore di Sicurezza non risulta più essere dipendente dallo spessore s della fondazione, *figura 16*, la rottura che avviene si sviluppa unicamente nella scarpata arginale. Si può quindi dedurre che la tipologia di rottura dell'argine, oltre al Fattore di Sicurezza, non abbia più una dipendenza diretta dallo spessore della fondazione per alti valori di quest'ultimo parametro.

Analizzando invece la *figura 17*, quando lo spessore della fondazione influenza ancora la variazione del parametro FS, possiamo notare che la configurazione di rottura è di tipo uplift.

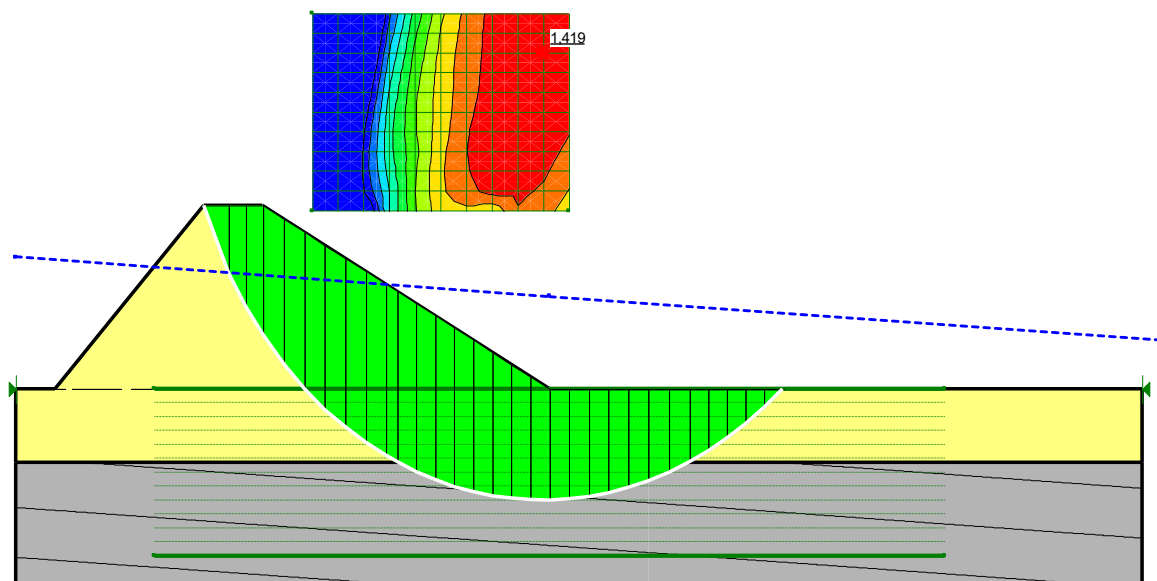


Figura 17 - Configurazione critica per argine con inclinazione della scarpata di 27°, H piezometrica al piede dell'argine 3,3 m e spessore fondazione di 2,5 m

Tabella 3 - Tabella valori FS al variare dello spessore della fondazione e dell'inclinazione della scarpata con indicate le tre diverse tipologie di rottura individuate all'interno della simulazione. Il colore blu indica le rotture di tipo uplift, il colore rosso indica le rotture che si sviluppano senza il raggiungimento delle sovrappressioni necessarie alla condizione di uplift, il colore arancione indica una rottura del solo corpo arginale

Spessore fondazione / Inclinazione scarpata	0,5 m	1 m	1,5 m	2 m	2,5 m	3 m	3,5 m	4 m	4,5 m	5 m
Inclinazione 38°	0,912	1,001	1,034	1,034	1,034	1,034	1,034	1,034	1,034	1,034
Inclinazione 36°	0,944	1,04	1,109	1,113	1,113	1,113	1,113	1,113	1,113	1,113
Inclinazione 34°	0,967	1,054	1,122	1,155	1,155	1,155	1,155	1,155	1,155	1,155
Inclinazione 33°	0,99	1,077	1,143	1,193	1,193	1,193	1,193	1,193	1,193	1,194
Inclinazione 32°	0,997	1,093	1,156	1,224	1,231	1,231	1,231	1,231	1,231	1,231
Inclinazione 31°	1,019	1,11	1,17	1,238	1,271	1,271	1,271	1,271	1,271	1,271
Inclinazione 30°	1,04	1,13	1,186	1,250	1,313	1,313	1,313	1,313	1,313	1,313
Inclinazione 29°	1,047	1,153	1,204	1,263	1,333	1,356	1,356	1,356	1,356	1,356
Inclinazione 28°	1,068	1,17	1,221	1,279	1,345	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Inclinazione 27°	1,089	1,189	1,236	1,291	1,354	1,419	1,446	1,446	1,446	1,446
Inclinazione 26°	1,094	1,209	1,251	1,306	1,363	1,431	1,492	1,492	1,492	1,492

In *tabella 3* sono stati riportati tutti i valori del Fattore di Sicurezza al variare dello spessore s della fondazione e dell'inclinazione β della scarpata. In particolare, all'interno della tabella, sono state evidenziate le tre diverse tipologie di rottura che sono state individuate nelle simulazioni numeriche. Con il colore rosso sono state indicate le rotture che avvengono sia sulla parte inferiore della scarpata arginale sia sulla fondazione ma che non sono riconducibili ad una rottura di tipo uplift; tale tipologia di rottura è caratterizzata dai valori più bassi in assoluto del Fattore di Sicurezza e si verifica sempre per valori dello spessore della fondazione pari a 0,5 m. In blu sono evidenziate le rotture degli argini riconducibili ad un fenomeno di tipo uplift, che tende a presentarsi per valori di spessore della fondazione tanto più elevati al diminuire dell'inclinazione della scarpata arginale. In arancione sono invece individuate le rotture che avvengono solo nel corpo dell'argine, queste tipologie di rottura sono caratterizzate da alti valori dello spessore s della fondazione ma anche da alti valori del parametro FS.

Da questa prima campagna di analisi si può concludere che il parametro s dello spessore della fondazione influenza notevolmente il tipo di rottura che avviene. In particolare, la rottura di tipo uplift tende a non presentarsi nel momento in cui il valore dello spessore della fondazione risulta abbastanza alto, al contrario un argine tende a presentare questa tipologia di rottura nel momento in cui ha uno spessore di fondazione contenuto entro un certo range che varia in base all'inclinazione β della scarpata.

Successivamente viene effettuata una seconda analisi di tipo descrittivo qualitativo che va a studiare l'andamento del parametro FS al variare della pendenza della scarpata tenendo costante nella singola analisi il valore dello spessore della fondazione.

Analizzando il grafico riportato in *figura 18* si può notare come il Fattore di Sicurezza abbia un andamento decrescente all'aumentare dell'inclinazione β della scarpata per cui si può dire che vi sia una dipendenza diretta tra questi due parametri.

Inoltre, si nota che per i casi in cui lo spessore della fondazione è superiore a 3,5 m le linee collassano su un'unica retta, questa è sempre una conseguenza del fatto che il Fattore di Sicurezza risulta indipendente dallo spessore di fondazione nel momento in cui questo assume valori elevati.

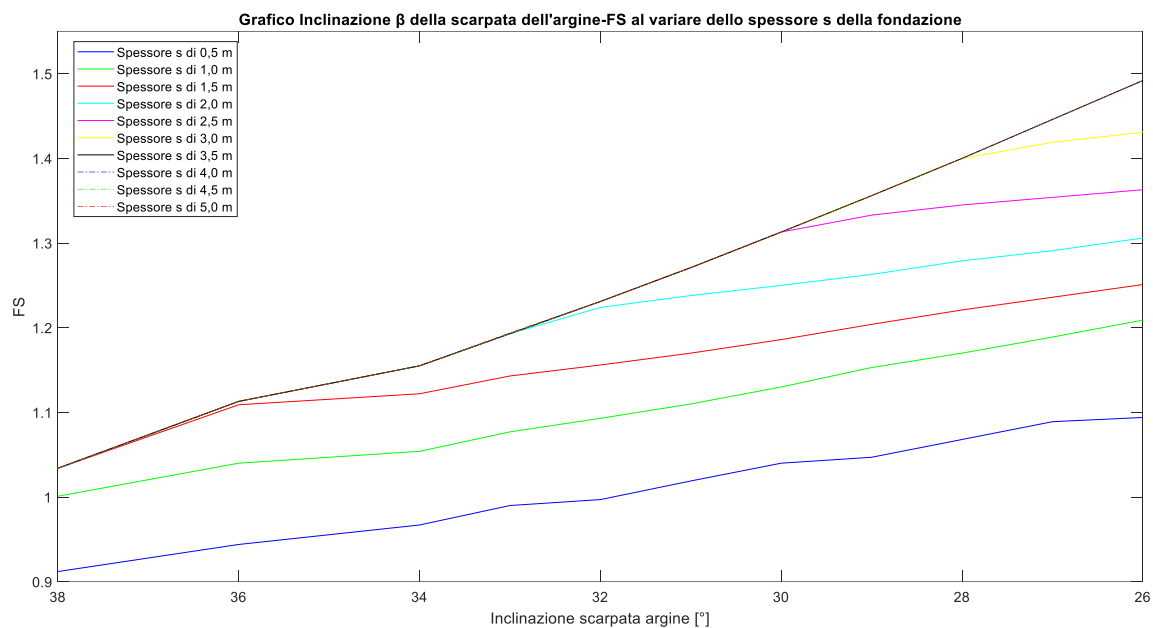


Figura 18 - Grafico inclinazione β della scarpata dell'argine su FS al variare dello spessore s della fondazione

Come affermato nelle analisi effettuate in precedenza la rottura di tipo Uplift si verifica per spessore di fondazione che risulta sempre pari a 1, tende inoltre a presentarsi per altri valori dello spessore della fondazione ma non per tutte le inclinazioni della scarpata.

Le curve corrispondenti a queste condizioni risultano essere la curva verde, spessore di 1 m, per tutti i valori, la curva rossa e azzurra per la maggior parte dei valori; per pendenze inferiori ai 30° si considera anche la curva rosa e quella gialla.

Si può notare che queste curve hanno un andamento quasi lineare per cui è possibile andare a determinare una retta di regressione al fine di andare a determinare una legge matematica che vada a descrivere la rottura di tipo uplift. Tuttavia, è utile andare a considerare solo le curve con uno spessore della fondazione compreso nel range [1 m – 2,5 m] dal momento che per $s=3$ m non si hanno a disposizione un numero sufficiente di punti per effettuare un'analisi inferenziale.

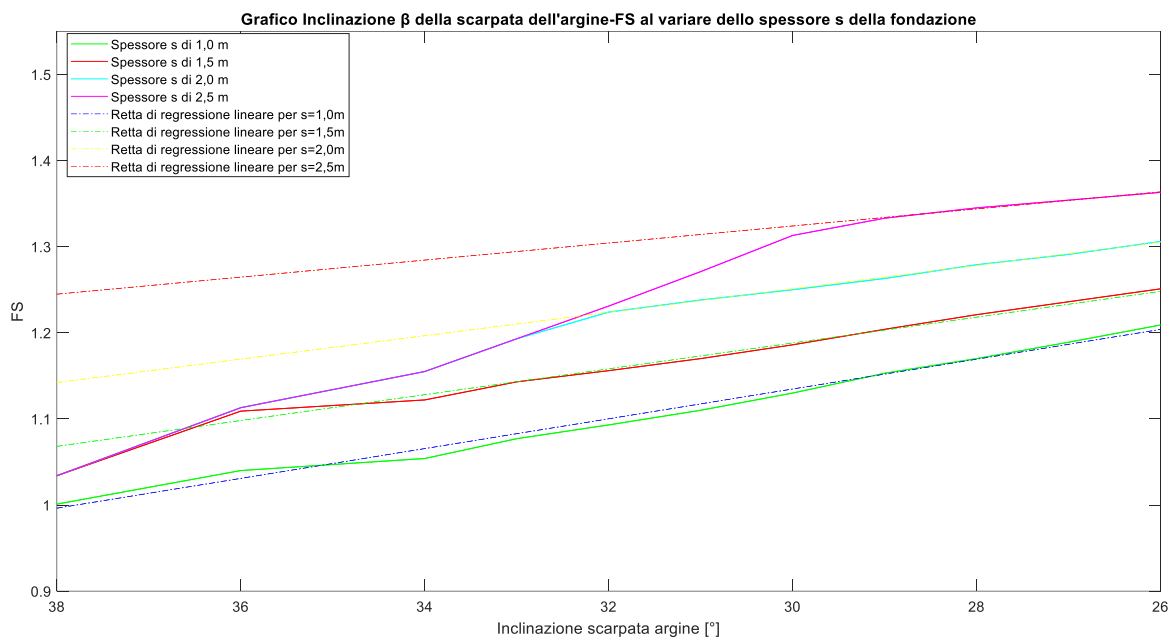


Figura 19 - Grafico inclinazione β della scarpata dell'argine su FS al variare dello spessore s della fondazione con rette di regressione lineare associate ai valori dello spessore della fondazione

Tabella 4 - Equazioni delle rette di regressione che descrivono l'andamento della rottura di tipo uplift

Spessore della fondazione [m]	Equazione della retta di regressione lineare	Fattore R^2
1,00	$y = -0,0173x + 1,6537$	0,9904
1,50	$y = -0,015x + 1,6381$	0,99907
2,00	$y = -0,0136 x + 1,659$	0,999
2,50	$y = -0,0099 x + 1,621$	0,9945

Analizzando le tre diverse equazioni delle rette di regressione lineare possiamo notare come i tre coefficienti angolari siano significativamente diversi. Per tale motivo non è possibile andare a determinare una legge matematica che descriva l'andamento della rottura di tipo uplift al variare del parametro FS e dell'inclinazione della scarpata β ; sarà quindi necessario effettuare un numero maggiore di simulazioni in modo tale da determinare una legge.

È possibile calcolare alcuni indicatori statistici per determinare l'affidabilità del modello utilizzato rispetto ai dati, ovvero l'efficacia nel rappresentarli, per cui si valutato l'andamento dei coefficienti di determinazione R^2 , il quale descrive l'adattabilità della retta di regressione

alla distribuzione dei dati. Possiamo quindi notare che tali valori risultano essere al di sopra di 0,99, per cui le rette riescono a rappresentare piuttosto bene i dati del modello.

CAPITOLO 5

CONCLUSIONI

Il presente elaborato si è posto l'obiettivo di valutare la dipendenza della geometria del rilevato arginale dal metodo di rottura e di valutarne, in particolare, una possibile correlazione con la rottura di tipo uplift per una data stratigrafia del terreno.

È stato quindi simulato l'andamento delle superfici di rottura per 110 simulazioni effettuate su un rilevato arginale al variare di una serie di parametri, tra i quali l'inclinazione della scarpata arginale e lo spessore della fondazione, sono state ottenute una serie di grafici da cui è stato possibile studiarne il comportamento.

Una prima serie di analisi di tipo descrittivo effettuata sulla tipologia di rottura che si verifica sull'argine ha portato ad affermare che si verificano tre diverse tipologie di rotture. In particolare, il metodo dell'uplift tende a verificarsi quando lo spessore della fondazione è contenuto all'interno del range [1 m – 3 m]. È interessante notare come negli argini con inclinazione della scarpata pari a 26° sia più diffusa la rottura di tipo uplift rispetto ad argini con inclinazione della scarpata pari a 38° . Quindi, la condizione di uplift tende a verificarsi maggiormente in argini in cui il parametro dell'inclinazione della scarpata risulta $\beta \leq 30^\circ$.

È stata effettuata anche un'analisi descrittivo quantitativo con l'obiettivo di andare a determinare una formulazione matematica che riuscisse a descrivere l'andamento della rottura di tipo uplift in funzione dell'inclinazione della scarpata arginale e del Fattore di Sicurezza. Tuttavia, dato il numero limitato di simulazioni numeriche, non è stato possibile andare a determinare una legge matematica che vada a descrivere tale tipologia di rottura.

Le analisi effettuate all'interno del presente elaborato hanno permesso di delineare le principali caratteristiche del metodo di rottura dell'uplift e hanno permesso di determinare, per un problema bidimensionale, le relazioni che esistono tra i vari parametri che influenzano l'avvenimento di tale metodo di rottura. Nel corso dei prossimi studi è consigliabile andare ad ampliare il numero di simulazioni numeriche al fine di avere una miglior stima delle relazioni tra i vari parametri e avere la possibilità di andare a definire una legge matematica che riesca a descrivere in modo analitico il metodo di rottura; inoltre, si propone di andare ad effettuare un'analisi dello sviluppo in 3D del fenomeno di rottura in modo tale da andarlo a confrontare con lo sviluppo bidimensionale.

APPENDICE

Tabella A - Simulazioni numeriche effettuate

ID	Progressivo test	Altezza H argine [m]	Inclinazione β scarpata [°]	Spessore s fondazione [m]	h piezometrica al piede [m]	FS
ARGINE 1	100000	7,5	38	1,0	1,8	0,912
ARGINE 1	100001	7,5	38	0,5	1,3	1,001
ARGINE 1	100002	7,5	38	1,5	2,3	1,034
ARGINE 1	100003	7,5	38	2,0	2,8	1,034
ARGINE 1	100004	7,5	38	2,5	3,3	1,034
ARGINE 1	100005	7,5	38	3,0	3,8	1,034
ARGINE 1	100006	7,5	38	3,5	4,3	1,034
ARGINE 1	100007	7,5	38	4,0	4,8	1,034
ARGINE 1	100008	7,5	38	4,5	5,3	1,034
ARGINE 1	100009	7,5	38	5,0	5,8	1,034
ARGINE 2	200000	7,5	36	1,0	1,8	1,04
ARGINE 2	200001	7,5	36	0,5	1,3	0,944
ARGINE 2	200002	7,5	36	1,5	2,3	1,109
ARGINE 2	200003	7,5	36	2,0	2,8	1,113
ARGINE 2	200004	7,5	36	2,5	3,3	1,113
ARGINE 2	200005	7,5	36	3,0	3,8	1,113
ARGINE 2	200006	7,5	36	3,5	4,3	1,113
ARGINE 2	200007	7,5	36	4,0	4,8	1,113
ARGINE 2	200008	7,5	36	4,5	5,3	1,113
ARGINE 2	200009	7,5	36	5,0	5,8	1,113
ARGINE 3	300000	7,5	34	1,0	1,8	1,054
ARGINE 3	300001	7,5	34	0,5	1,3	0,967
ARGINE 3	300002	7,5	34	1,5	2,3	1,122
ARGINE 3	300003	7,5	34	2,0	2,8	1,155
ARGINE 3	300004	7,5	34	2,5	3,3	1,155
ARGINE 3	300005	7,5	34	3,0	3,8	1,155
ARGINE 3	300006	7,5	34	3,5	4,3	1,155
ARGINE 3	300007	7,5	34	4,0	4,8	1,155
ARGINE 3	300008	7,5	34	4,5	5,3	1,155
ARGINE 3	300009	7,5	34	5,0	5,8	1,155
ARGINE 4	400000	7,5	33	1,0	1,8	1,077
ARGINE 4	400001	7,5	33	0,5	1,3	0,99
ARGINE 4	400002	7,5	33	1,5	2,3	1,143
ARGINE 4	400003	7,5	33	2,0	2,8	1,193
ARGINE 4	400004	7,5	33	2,5	3,3	1,193
ARGINE 4	400005	7,5	33	3,0	3,8	1,193
ARGINE 4	400006	7,5	33	3,5	4,3	1,193
ARGINE 4	400007	7,5	33	4,0	4,8	1,193

ARGINE 4	400008	7,5	33	4,5	5,3	1,193
ARGINE 4	400009	7,5	33	5,0	5,8	1,194
ARGINE 5	500000	7,5	32	1,0	1,8	1,093
ARGINE 5	500001	7,5	32	0,5	1,3	0,997
ARGINE 5	500002	7,5	32	1,5	2,3	1,156
ARGINE 5	500003	7,5	32	2,0	2,8	1,228
ARGINE 5	500004	7,5	32	2,5	3,3	1,231
ARGINE 5	500005	7,5	32	3,0	3,8	1,231
ARGINE 5	500006	7,5	32	3,5	4,3	1,231
ARGINE 5	500007	7,5	32	4,0	4,8	1,231
ARGINE 5	500008	7,5	32	4,5	5,3	1,231
ARGINE 5	500009	7,5	32	5,0	5,8	1,231
ARGINE 6	600000	7,5	31	1,0	1,8	1,11
ARGINE 6	600001	7,5	31	0,5	1,3	1,019
ARGINE 6	600002	7,5	31	1,5	2,3	1,17
ARGINE 6	600003	7,5	31	2,0	2,8	1,238
ARGINE 6	600004	7,5	31	2,5	3,3	1,271
ARGINE 6	600005	7,5	31	3,0	3,8	1,271
ARGINE 6	600006	7,5	31	3,5	4,3	1,271
ARGINE 6	600007	7,5	31	4,0	4,8	1,271
ARGINE 6	600008	7,5	31	4,5	5,3	1,271
ARGINE 6	600009	7,5	31	5,0	5,8	1,271
ARGINE 7	700000	7,5	30	1,0	1,8	1,13
ARGINE 7	700001	7,5	30	0,5	1,3	1,04
ARGINE 7	700002	7,5	30	1,5	2,3	1,186
ARGINE 7	700003	7,5	30	2,0	2,8	1,25
ARGINE 7	700004	7,5	30	2,5	3,3	1,313
ARGINE 7	700005	7,5	30	3,0	3,8	1,313
ARGINE 7	700006	7,5	30	3,5	4,3	1,313
ARGINE 7	700007	7,5	30	4,0	4,8	1,313
ARGINE 7	700008	7,5	30	4,5	5,3	1,313
ARGINE 7	700009	7,5	30	5,0	5,8	1,313
ARGINE 8	800000	7,5	29	1,0	1,8	1,153
ARGINE 8	800001	7,5	29	0,5	1,3	1,047
ARGINE 8	800002	7,5	29	1,5	2,3	1,204
ARGINE 8	800003	7,5	29	2,0	2,8	1,263
ARGINE 8	800004	7,5	29	2,5	3,3	1,333
ARGINE 8	800005	7,5	29	3,0	3,8	1,356
ARGINE 8	800006	7,5	29	3,5	4,3	1,356
ARGINE 8	800007	7,5	29	4,0	4,8	1,356
ARGINE 8	800008	7,5	29	4,5	5,3	1,356
ARGINE 8	800009	7,5	29	5,0	5,8	1,356
ARGINE 9	900000	7,5	28	1,0	1,8	1,17
ARGINE 9	900001	7,5	28	0,5	1,3	1,068
ARGINE 9	900002	7,5	28	1,5	2,3	1,221
ARGINE 9	900003	7,5	28	2,0	2,8	1,279
ARGINE 9	900004	7,5	28	2,5	3,3	1,345

ARGINE 9	900005	7,5	28	3,0	3,8	1,4
ARGINE 9	900006	7,5	28	3,5	4,3	1,4
ARGINE 9	900007	7,5	28	4,0	4,8	1,4
ARGINE 9	900008	7,5	28	4,5	5,3	1,4
ARGINE 9	900009	7,5	28	5,0	5,8	1,4
ARGINE 10	1000000	7,5	27	1,0	1,8	1,189
ARGINE 10	1000001	7,5	27	0,5	1,3	1,204
ARGINE 10	1000002	7,5	27	1,5	2,3	1,236
ARGINE 10	1000003	7,5	27	2,0	2,8	1,291
ARGINE 10	1000004	7,5	27	2,5	3,3	1,354
ARGINE 10	1000005	7,5	27	3,0	3,8	1,419
ARGINE 10	1000006	7,5	27	3,5	4,3	1,446
ARGINE 10	1000007	7,5	27	4,0	4,8	1,446
ARGINE 10	1000008	7,5	27	4,5	5,3	1,446
ARGINE 10	1000009	7,5	27	5,0	5,8	1,446
ARGINE 11	1100000	7,5	26	1,0	1,8	1,209
ARGINE 11	1100001	7,5	26	0,5	1,3	1,094
ARGINE 11	1100002	7,5	26	1,5	2,3	1,251
ARGINE 11	1100003	7,5	26	2,0	2,8	1,306
ARGINE 11	1100004	7,5	26	2,5	3,3	1,363
ARGINE 11	1100005	7,5	26	3,0	3,8	1,431
ARGINE 11	1100006	7,5	26	3,5	4,3	1,492
ARGINE 11	1100007	7,5	26	4,0	4,8	1,492
ARGINE 11	1100008	7,5	26	4,5	5,3	1,492
ARGINE 11	1100009	7,5	26	5,0	5,8	1,492

BIBLIOGRAFIA

- H.G.B. Allersma, A. Rohe, Centrifuge tests on the failure of dikes caused by uplift pressure, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics* 1, 2003.
- A. Amabile, A. Pozzato, A. Tarantino, Instability of flood embankments due to pore-water pressure build-up at the toe: lesson learned from the Adige River case study, 2020.
- M. Berti, Appunti di analisi di stabilità dei versanti all'equilibrio limite, Università degli studi di Bologna, 1999.
- CIRIA, Ministry of Ecology of United Kingdom, USACE. The International Levee Handbook. CIRIA, London, 2013.
- P. Colombo, F. Colleselli, Elementi di geotecnica, Zanichelli, 1996.
- Craig R. F., Craig's soil mechanics, seventh edition.
- V. Fioriotto, Sulla determinazione della superficie critica nell'analisi della stabilità dei rilevati, 1985.
- GEO-SLOPE International Ltd., Stability Modeling with GeoStudio.
- NTC 2018- Norme Tecniche per le costruzioni.
- P. Simonini, S. Cola, S. Bersan, Caratterizzazione geotecnica, meccanismi di collasso e monitoraggio degli argini fluviali. Atti del XXV convegno Italiano di Geotecnica, 2014.
- M. A. Van, A. R. Koelewijn, F. B. J. Barends, Uplift Phenomenon: Model, Validation and Design, Article in *International Journal of Geomechanics*, 2005.